

気体中における音速の測定

笠原 中庸

高等学校物理の内容の一つである「波動」の指導に当たり、種々の気体について音速を測定する簡単な実験を紹介する。この実験によれば、シンクロスコープの画面上で、波の数を数えることにより音速を、波の移動の大きさを読みとることにより、温度による音速の変化を測定できる。さらに、この測定結果は、「気体分子の運動」の内容に関係する比熱比へと発展させられる。

1. はじめに

高等学校物理の内容の一つに、「波動」があり、観察、実験を通して、波動の基本的な概念や性質を理解させ、波動の具体的な例として日常生活に関係の深い音と光の性質を調べ、音と光を波動として統一的に理解させることをねらっている。そして、この一環として、音に関する諸現象を、実験的に扱い、音の波動性を理解させることになっている。¹⁾

しかし、音は目に見えず、その伝搬速度も大きいため、生徒にその姿を捕えさせることがむづかしい。最も基本的な高速の測定についてみても、従来より色々工夫がなされてきているところであるが、²⁾測定結果の精度が悪かったり、装置が複雑だったりして、種々の気体について、気軽に音速を測定できるような方法が見当たらない。

そこで、この報告では、次のような条件を満たす実験、観察を工夫した。

- ① 種々の気体の音速がかなりの精度で簡単に測定できる。
 - ② 音速の温度依存性についても測定できる。
 - ③ 生徒が音の波を扱う中で、波動の基本的な性質（振動数、波長、速度など）について、理解を深めることができる。
 - ④ 最近、求めやすくなった二現象シンクロスコープも含め、身近にある器機を用い装置が組める。
- また、この報告では、音速の測定に関連して、比熱比 $\gamma = C_p / C_v$ の測定にも言及する。

2. 気体中における音速の測定

以下の議論では、気体を理想気体とみなし、その振動は準静的、断熱的に行われると考えることにする。つまり、気体の圧力を p 、1モルの体積を v 、絶対温度を T 、気体常数を R とし、定圧比熱 C_p と定積比熱 C_v の比である比熱比を $\gamma (\gamma = C_p / C_v)$ とすると、

$$pv = RT, \dots\dots(1)$$

$$pv^\gamma = \text{const.} \dots\dots(2)$$

よく知られているように、この式(1)と(2)より、気体の粘性を無視し、密度を ρ とすると、この気体の音速 u は、

$$u = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} \dots\dots(3) \quad \text{これより,}$$

$$u = u_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \dots\dots(4)$$

で与えられる。ここに、 t はセツ氏目盛 ($^{\circ}\text{C}$) の温度 ($t + 273 = T$) で、 u_0 と T_0 は $t = 0 (^{\circ}\text{C})$ における音速 u と絶対温度 T である。気体が空気の場合、式(4)は、温度変化のあまり大きくない範囲において、

$$u_{\text{air}} = u_0 \sqrt{\frac{t+273}{273}} \approx u_0 \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{t}{273} \right) = 331 + 0.61t \text{ (m/s)} \dots\dots\dots (5)$$

となる。

実験 1 種々の気体中における音速の測定

(1) 原理

説明を簡単にするために、波の減衰はないものとして、
図1に示すような管内を伝搬する平面波

$$y = y_0 \sin 2\pi f(t - x/u) \dots\dots\dots (6)$$

を考える。ここに、 y は空気分子の変位、 y_0 は振幅、 f は振動数である。

Cで発せられた音波がA→Bと伝搬してゆくわけであるが、A点での波動でシンクロスコープのトリガーをかけ、その波形 y_A を $y_A = y_0 \sin 2\pi f t$ となるようにすると、B点での波形 y_B は式(6)より時間的に l/u だけ、おくれた、 $y_B = y_0 \sin 2\pi f(t - l/u)$ となる。この様子を横軸が時間軸であるシンクロスコープの画面上でみたところを図2に示す。波動のそれぞれの部分を2つのチャンネル (ch1 と ch2) でひろっていることになる。

ところで、波長を λ とすると、AB間 (長さ l) に存在する波の数 n は

$$n = \frac{l}{\lambda} = \frac{f l}{u} \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。今、振動数 f を f_1 から f_2 に変化させると、AB間の波の数 n は n_1 から n_2 に変化する、この波の数の変化 $\Delta n = n_2 - n_1$ は式(7)より、

$$\Delta n = \frac{l}{u} (f_2 - f_1) \text{ となり、 } u = \frac{l}{\Delta n} (f_2 - f_1) \dots\dots\dots (8)$$

の関係が成立つ。この振動数を変化させた時の波の数の変化 Δn 及び f_1 、 f_2 をシンクロスコープの画面上で測定する (図3) ことにより、式(8)より音速 u を測定することができる。

(2) 装置

図4のような装置を組む。この時、空気以外の気体の

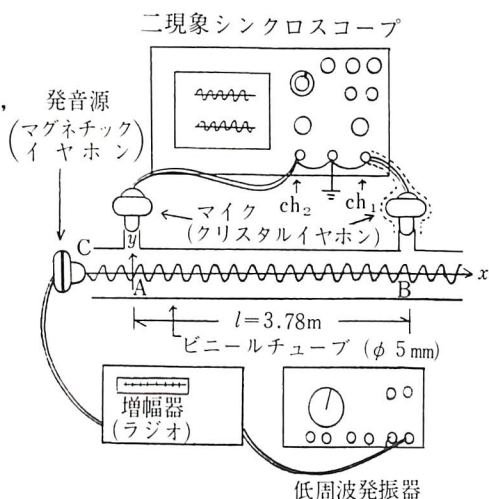


図1 気体中における音速の測定

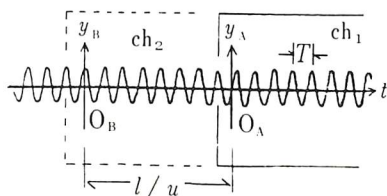


図2 ch1 と ch2 でひろった波形の部分

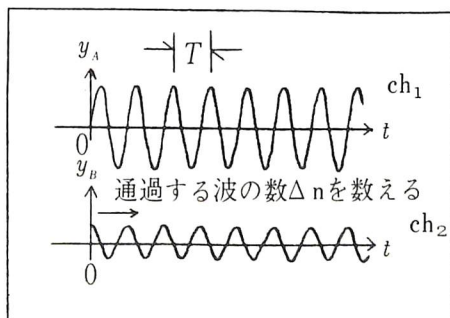


図3 波の数の変化 Δn の測定

音速測定に当っては、イヤホンと活栓の結合部及び、イヤホン本体からの気体のもれを防止するため、もれ部分に接着剤をぬる。図4の主要部を含め、図1の装置を組む。

（3）方法

- ① シンクロスコープ、低周波発振器、増幅器の電源を入れる。
- ② 活栓 P_A 、 P_B を開け、測定する気体を Q_A より注入する。注入後すぐに活栓 P_A 、 P_B は閉る。
- ③ 低周波発振器を調節して、発音源より $f_1 = 1\text{kHz}$ の音波を発生する（振動数はシンクロスコープの画面上で読みとる）。
- ④ 音波の振動数を上げながら図3に示すように、通過する波の数 Δn を数え、20ヶ通過した所で、音波の振動数 f_2 を読みとる。
- ⑤ ③、④の測定結果より、式(8)から音速 u を求める。
- ⑥ 振動数 f_1 や通過する波の数 Δn を変えて、音速 u を測定する。
- ⑦ 測定する気体の種類を変えて、音速 u を測定する。

種々の気体中における音速の測定結果の例を表1に示す。また、この方法は、原理的に「音速は振動数に依存しない」として式(8)を導いているわけであるが、上の方法の⑥において測定された、音速 u の振動数 f との関係を図5に示す。

実験2 気体の温度変化に伴う音速の変化

（1）原理

実験1の方法により、それぞれの温度における音速を測定しても良いが、時間がかかり、精度的にも十分とは言えないので、次の様な方法をとる。つまり、音速 u が変化すると、図2に示されるシンクロスコープのch2の画面が l/u に従い平行移動する（画面上では波形が逆に平行移動したように見える）。そこで、気体の温度 T_0 、 T における音速をそれぞれ u_0 、 u とすると、画面上での波形の移動 Δt は、 $\Delta t = l/u_0 - l/u$ となるので、音

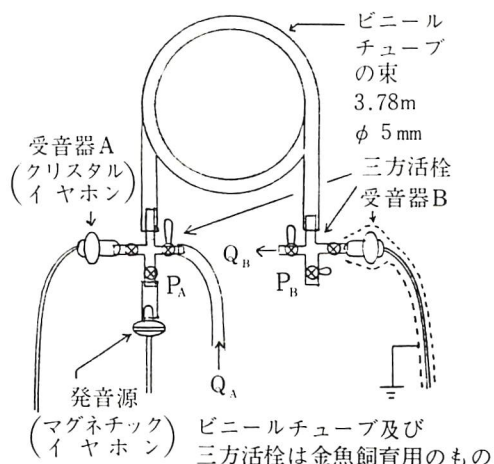


図4 音速測定装置の主要部

表1 気体中における音速の測定結果の例

（気体の温度 22.5°C ）

気 体	計算値*) (m/s)	測定値 (m/s)
ヘリウム [He]	1012.5	980 ± 8
窒 素 [N ₂]	350.4	349 ± 5
空 気	344.7	342 ± 5
二酸化炭素 [CO ₂]	272.4	273 ± 5
エチルエーテル [(C ₂ H ₅) ₂ O]	217.2	210 ± 20

*) $u = \sqrt{\gamma RT/M}$ ……式(10)による。

+) He は拡散速度が大きく、誤差が大きくなる。

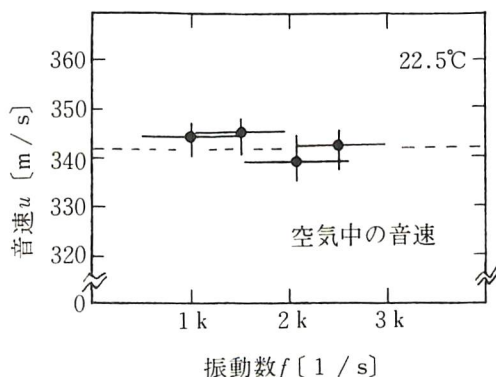


図5 空気中を伝搬する音の振動数とその速さ

速の変化 Δt は、 $u_0 \Delta t \ll l$ の範囲内で、

$$\Delta u = (u - u_0) = \frac{u_0^2 \Delta t}{l - u_0 \Delta t} \approx \frac{u_0^2}{l} \Delta t \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる (ただし、この場合の l は温度が変化するチューブ束の部分の長さとする)。

そこで、シンクロスコープの画面上で波形の移動を時間 Δt として測定すれば、式(9)より、音速の変化を測定できる。

(2) 方法 (実験1 参照)

- ① 図4におけるビニールチューブ束を恒温槽に沈める。
- ② 各測定装置の電源を入れ、チューブに測定する気体を封入する。発音源より5kHzの音波を発生させる。
- ③ 恒温槽の温度 T を変えながら、シンクロスコープの画面上の波形 y_B の移動 Δt と温度 T とを記録する。
- ④ T と Δt のデータから式(9)により、音速の変化 Δu と温度 T との関係を求め、図6にまとめる。

注意 ビニールチューブは温度が高くなると (およそ40℃)、有機ガスを放出することがあるので、40℃以上ではガラス管を用いる方が無難である。

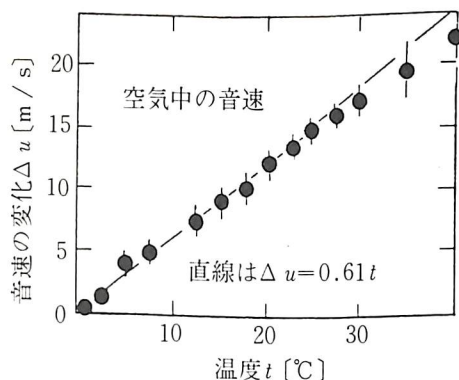


図6 音速の温度依存性についての測定例

表2 比熱比 γ の測定結果の例

温度 22.5℃ (気体の分子量は既知とした)

気 体	理論値*)	測定値
ヘリウム [He]	1.67	1.5 ^{*)}
窒素 [N ₂]	1.40	1.4
空 気	(1.40)	1.4
二酸化炭素 [CO ₂]	1.33	1.3
エチルエーテル [(C ₂ H ₅) ₂]	1.33	1.2

*) 統計力学 (エネルギー等配則) により、1 原子分子の γ は 5/3、2 原子分子は 7/5、3 原子分子は 8/6、… が予想される。

実験3 比熱比 γ の測定

(1) 原理

気体 1 モルの質量を M (分子量 g) とすると、気体の密度 ρ は式(1)より、 $\rho = M/v = Mp / (RT)$ で与えられ、式(3)より γ を求めると、

$$\gamma = \frac{\rho u^2}{p} = \frac{Mu^2}{RT} \dots\dots\dots (10)$$

となる。つまり、 ρ 又は M がわかれば、音速 u を測定することにより、比熱比 γ を測定することができる。

また、式(10)により、 $Mu^2/2 = \gamma RT/2$ であり、一方、

分子の熱運動の速度を c とすると $M\langle c^2 \rangle / 2 = 3RT/2$ が成立つから、 $\langle c^2 \rangle \approx u^2$ となり、音速を測定することは、熱運動の速度 c の目安を得ることにもなる。

(2) 方法

実験1の方法により、音速 u を測定し、式(10)より、比熱比 γ を求める。

文 献

- 1) 高等学校学習指導要領 文部省 実教出版 昭和54年5月
- 2) 物理実験事典 藤岡由夫、朝永振一郎監修。池本義夫編 講談社、P 234 昭和56年9月1日
草鹿監一 実教観察教材教具 大塚明郎監修、芦葉浪久編集 東京書籍 P 329 昭和53年2月17日